基于粒子群算法的压水堆控制系统设定值决策研究

张琦[1] 张贤山[2] 孙培伟[1] 魏新宇[1]
1（西安交通大学 核科学与技术学院 西安 710049）
2（北京和利时工业软件有限公司 北京 100176）

摘要 目前压水堆电厂控制以传统 PID (Proportional Integral Derivative) 控制器为主，虽然已有采用先进控制算法提升控制系统性能的研究，但大多都只针对单个控制系统，未能充分考虑多个控制系统之间存在的互联耦合。为了从顶层协调多个控制系统提升整体控制性能，本文提出了基于粒子群优化算法的压水堆控制系统设定值决策优化方法，构建了优化所需的决策目标函数及决策优化需要满足的运行约束条件。建立的智能决策系统，考虑压水堆的运行实际进行设定值离线优化，根据运行工况进行在线智能决策。本文以压水堆核电厂运行中的典型过程为例进行了设计的智能决策系统仿真实验，并对仿真结果进行分析，仿真结果表明所提出的智能决策系统可以有效减小系统的 ITSE (Integral of Time multiplied by the Square Error) 和峰值，提升了压水堆电厂控制系统的整体控制性能和安全裕量。

关键词 设定值优化；智能决策；粒子群算法；压水堆；控制系统
中图分类号 TL362

基金资助：国家自然科学基金 (基金号 No.12075181)
第一作者：张琦，女，1994 年出生，2017 年毕业于南京师范大学，现为博士研究生（2020 年于核工业西南物理研究院获硕士学位），研究领域：核电厂控制、建模与仿真 E-mail：zhangqi09@stu.xjtu.edu.cn
通信作者：孙培伟，E-mail: sunpeiwei@mail.xjtu.edu.cn
收稿日期：2024-00-00，修回日期：2024-00-00
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12075181)
First author: ZHANG Qi, male, born in 1994, graduated from Nanjing Normal University in 2012, doctor student, (graduated from Southwestern Institute of Physics with a master’s degree in 2020) focusing on control, modeling and simulation of nuclear power plant.
Corresponding author: Sun Peiwei, E-mail: sunpeiwei@mail.xjtu.edu.cn

Research on setpoint decision of PWR control system based on PSO algorithm

ZHANG Qi[1] ZHANG Xianshan[2] SUN Peiwei[1] WEI Xinyu[1]
1(*School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China*)
2(*Hollysys Automation Technologies Ltd., Xi'an, 710065, China*)

基金资助：国家自然科学基金 (基金号 No.12075181)
第一作者：张琦，女，1994 年出生，2017 年毕业于南京师范大学，现为博士研究生（2020 年于核工业西南物理研究院获硕士学位），研究领域：核电厂控制、建模与仿真 E-mail：zhangqi09@stu.xjtu.edu.cn
通讯作者：孙培伟，sunpeiwei@mail.xjtu.edu.cn
收稿日期：2024-00-00，修回日期：2024-00-00
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12075181)
First author: ZHANG Qi, male, born in 1994, graduated from Nanjing Normal University in 2012, doctor student, (graduated from Southwestern Institute of Physics with a master’s degree in 2020) focusing on control, modeling and simulation of nuclear power plant.
Corresponding author: SUN Peiwei, E-mail: sunpeiwei@mail.xjtu.edu.cn

Abstract **[Background]**: With the development of digital control technology, the traditional instrument and control system based on analog quantity in nuclear power plant is gradually replaced by full digital technology, and it is possible to use more complex and efficient advanced control technology. Making full use of the advantages of system information in the process of digitization of the whole plant to improve the automation level of nuclear power plant has gradually become the focus of research on pressurized water reactor control system. The control systems of Pressurizer Water Reactor (PWR) nuclear power plant are based on traditional Proportional Integral Derivative (PID) controller. Although there are studies on improving the control performance of PWR NPP control systems by advanced control algorithms, such as neural network control, fuzzy control and model predictive control, most of them only focus on the control system itself without considering the interconnection and coupling among multiple control systems. The operation task of PWR nuclear power plant needs to be coordinated by multiple control systems at the same time, and the effect of improving the overall performance by simply improving the performances of the controllers are limited. **[Purpose]**: To comprehensively consider the coupling effect amonge control systems, coordinate multiple control systems from the top level to optimize the overall control performances and achieve better task execution results, a setpoint decision optimization system is proposed. **[Methods]**: The intelligent decision system for PWR control system was optimized based on particle swarm optimization (PSO) method. The decision objective function and operation constraint conditions of the intelligent decision system were proposed. Considering the actual operation of PWR, the system optimized the setpoint offline and the intelligent decision operation was performed online according to the operation condition to provide the directions and amplitudes of the control targets for the underlying control systems. The typical operation process of the PWR NPP was taken as an example to carry out the simulation of the deigned intelligent decision-making system, and the simulation results were analyzed. **[Results]**: Compared with the control scheme using traditional setpoints, the ITSE (Integral of Time multiplied by the Square Error) of average coolant temperature, pressurizer level, pressurizer pressure and steam generator level decreased by 58.9%, 67.7%, 99.9% and 83.3%, respectively. The peak value decreased by 62.4%, 3.0%, 100% and 66.3% respectively. The simulation results show that the system proposed in this paper can effectively reduce the ITSE and peak value of the system. The overall control performances and safety margin of the control systems of PWR NPP are improved. In practical engineering practice, it can be combined with digital twin technology to use the characteristics of the twin that can synchronously reflect the real state of the system for more accurate online setpoint optimization, so as to achieve better control performance.

Key words Setpoint optimization, Intelligent decision-making, particle swarm optimization method, Pressurizer Water Reactor, Control system.

随着数字控制技术的发展，核电机组中基于模拟量的传统仪控系统逐步被全数字化技术代替，采用更复杂高效的先进控制技术成为了可能，充分利用全厂数字化过程中新增系统信息的优势，实现核电机组的自动化水平提升，逐渐成为压水堆控制系统研究的重点[1]。

受制于核反应堆运行复杂和安全性高的特点，压水堆电厂控制以传统 PID (Proportional Integral Derivative) 控制器为主。目前针对先进控制算法，已开展了采用如神经网络控制[2]、模糊控制[3]、模型预测控制[4]等提升压水堆电厂控制系统性能的研究，这些研究证明，先进控制算法相比于传统 PID 控制可以很好地提升单个控制系统性能。但是，未能充分考虑多个控制系统之间存在的互联耦合，在同一时刻压水堆电厂的运行任务需要多个控制系统协调完成,仅靠单纯提高底层控制器性能来提升整体性能的效果有限。因此，本文提出了采用顶层决策协同设计的方法以进一步提升控制性能。

决策是为了实现特定的目标，在多种备选方案中选择特定的行动方案的过程[5]。智能决策系统可以整合监测信息，并输出底层控制系统的控制目标，协调控制多个子系统进而提升系统整体控制性能，取得更好的任务执行结果，其最终目标是产生类似人类决策甚至超越人类决策的行为[6, 7]。

针对核反应堆的顶层决策系统已有相关研究，如 1990 年 Edward 等人提出了基于状态反馈辅助的控制框架，该方案基于状态反馈优化设定值，实现对反应堆功率经典控制方案的改进[8]。随着先进控制技术的

发展，2009 年 Coban 等人结合专家经验和神经网络算法进行核功率控制系统设定值曲线的优化，满足多场景核功率控制的控制需求[9]。近几年来，Wang 等人采用设定值修正法对稳压器的压力控制效果进行了改进，在瞬态过程中，通过专家模糊逻辑在线生成设定值信号替代原恒定的设定值，在瞬态过程结束后切换回到原设定值[10]。尹刚利用电厂历史数据进行曲线拟合，根据蒸汽流量和汽轮机入口压力与反应堆功率之间的关系对汽轮机负荷设定值进行修正，改善了蒸汽压力的控制性能[11]。上述这些决策系统的研究仍以单个控制系统的性能优化为目标进行控制设定值的决策优化，没有综合考虑多个系统控制性能进行全局优化的相关研究。

本文综合考虑压水堆核电厂各个系统之间的能量传递关系，从顶层决策出发，提出了同时进行多个控制系统设定值决策的方案，构建了优化所需的决策目标函数及决策优化需要满足的运行约束条件，设计了设定值决策系统，并选取了典型工况对所设计的决策系统进行控制系统性能仿真测试，验证了所提出方法的正确性。

1　控制系统设定值决策方案

在压水堆传统运行方案中，根据稳态运行方案确定控制系统的设定值，在运行中有些控制系统设定值不变，如稳压器压力设定值；有些控制系统设定值如稳压器液位设定值，冷却剂平均温度设定值等，是按照固定的设定值曲线根据当前负荷设定值插值得到，如图 1 所示。

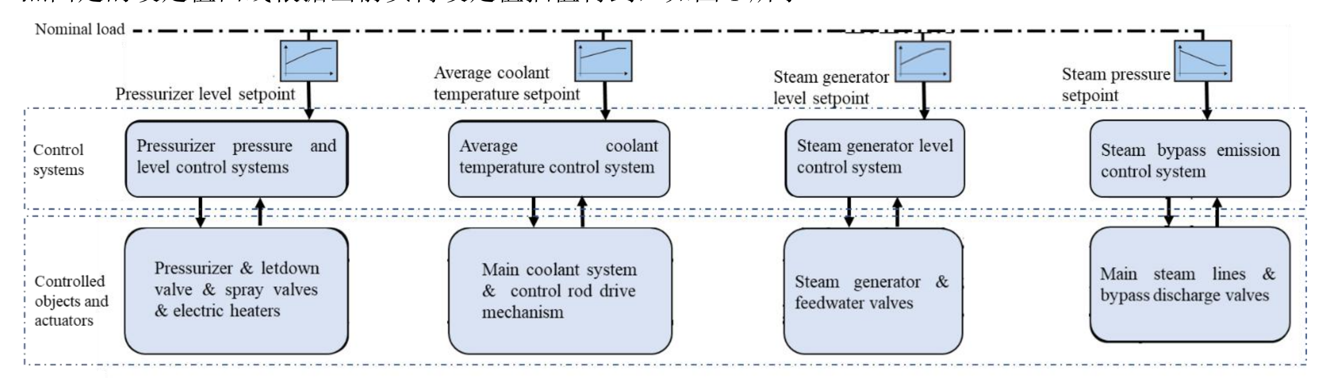


图 1　压水堆控制系统传统运行方案

Fig. 1 Traditional operation scheme of PWR control system

采用传统设定值方案，在瞬态过程中，当前状态下实测值与设定值的偏差只能依靠底层控制系统自身动作消除。为了提高各个控制系统的性能，前期已经开展了先进控制算法研究，包含基于模型预测控制算法的蒸汽发生器液位控制系统和蒸汽旁路控制系统，基于状态反馈控制算法的冷却剂平均温度控制系统和稳压器压力和液位控制系统，采用了这些先进控制技术，可以明显改善单个控制系统的控制性能[12]。但是，这些先进算法研究均是以单独的系统控制性能为目标，没有充分考虑各个控制系统之间的相互耦合。基于稳态运行方案的控制系统设定值，仅能反映能量守恒等的稳态关系，并不能体现瞬态过程中的实时控制目标。例如，稳压器液位设定值在降负荷过程中根据负荷设定值线性下降，但由于核功率相较于负荷响应较慢，引起稳压器液位一直在高于设定值波动，为了减小液位波动，可以在瞬态中降低液位设定值，提前降低稳压器液位，在瞬态结束后，将液位回复到原设定值以维持能量平衡。

为此，本文综合考虑各个系统之间的耦合作用，提出了控制系统设定值决策方案以进一步提高控制系统性能。具体方案如图2所示，针对工程师或切换程序给定的期望工况与当前工况信息，决策系统通过查询离线决策数据库得到对应优化设定值序列，据此修改设定值，在决策时域内对为压水堆核电厂底层控制系统即先进控制层，提供控制目标的方向和幅值。其中，决策数据库中包含了采用优化计算方法建立的给定工况的设定值修正曲线。相对于使用神经网络等在线计算输出的智能决策方法，采用离线优化设定值进行智能决策，能够允许操作员评估所生成的设定值曲线后再部署上线，具有显式的物理意义、更好的透明性和可追溯性，有利于实际现场实施。

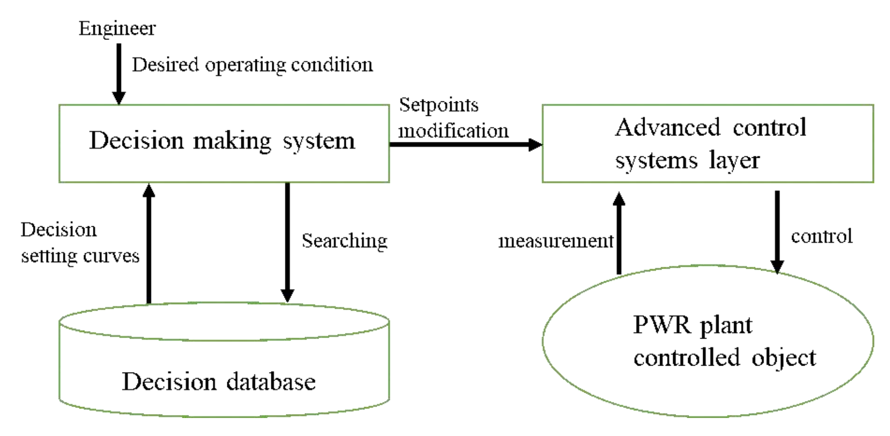


图 2　控制系统设定值决策方案
Fig. 2 Control system set point decision scheme

在该决策方案中，核心是获得给定工况对应的设定值优化曲线，传统的设定值曲线如图 3 所示的传统设定值，初始状态 x_0 通过当前给定功率水平获得，系统的目标状态 x_t 是通过给定目标功率水平获得，中间的下降斜率是由负荷变化速率确定。部署决策系统后，在 t_0 时刻引入设定值动态决策，为降低决策的复杂度，采用离散化计算的方式。设 r 为 t_0 至 t_e 的决策时域内一条设定值曲线，选取其中 n 个时间点 t_1，t_2，⋯ $t_n=t_e$，将设定值曲线离散化为一组包含 $r(1)$，$r(2)$……$r(n)$设定值的序列，$r(1)$，$r(2)$……的值通过优化计算获得，$r(n)$=目标状态 x_t；不同的序列之间采用一阶惯性环节实现过渡以减小设定值变化带来的扰动。当主要参数趋于稳定时，即 t_e 时刻，结束对设定值修改，恢复到稳态运行方案对应的终端名义设定值，保证系统达到稳定时各设定值的稳定。因此，设定值优化的输出就是控制系统的设定值 r 以及相应的时间序列 t。

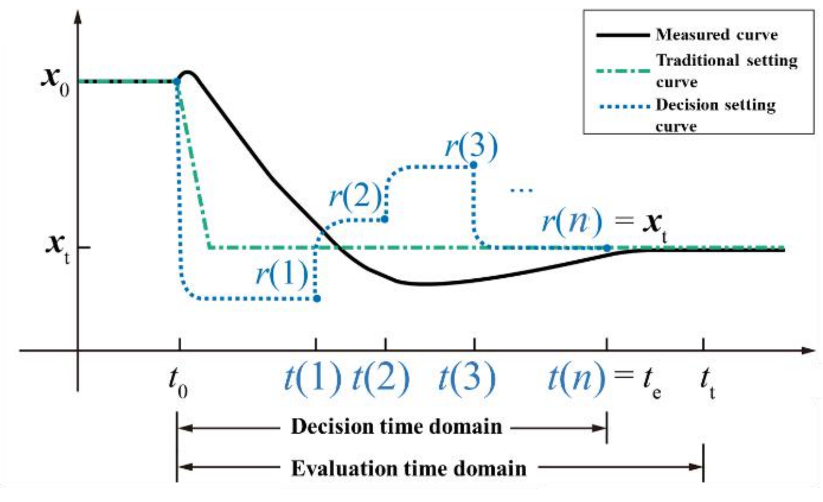


图 3　设定值优化方法
Fig. 3 Setpoint optimization method

在各时间序列内进行设定值优化时，目标函数的设置需考虑包括控制系统的跟踪性能指标、安全性指标和控制代价指标，其中跟踪性能指标通过误差平方矩的积分ITSE (Integral of Time multiplied by the Square Error) 体现，安全性指标通过关键参数偏离稳态值的峰值体现，控制代价指标通过执行机构动作平均矩的积分体现。并且，还需要考虑主要参数的安全运行约束、执行机构的限幅和限速等物理约束。目标函数的评价需要综合考虑t_0到t_t总的时间域。

2　控制系统设定值决策设计

第一章给出了设定值优化的方案，本章进行决策系统的设计，以“华龙一号”压水堆核电厂为研究对象，压水堆示意图如图 4 所示，关键参数如表 1 所示。为进行设定值优化的设计和验证，采用基于 MATLAB & Simulink 的压水堆仿真模型[13]，该模型依照压水堆电厂的工作原理、系统结构和功能，基于质量、能量

和动量守恒关系建立，包含三个具有可移动边界的自然循环 U 型管式蒸汽发生器模型、主冷却剂系统热工物理模型、基于临界流动假设的蒸汽旁路排放系统模型和采用三区非平衡态的稳压器模型。控制系统部分包含基于模型预测控制的蒸汽发生器液位控制系统和蒸汽旁路控制系统，基于状态反馈控制的冷却剂平均温度控制系统和稳压器压力及液位控制系统。

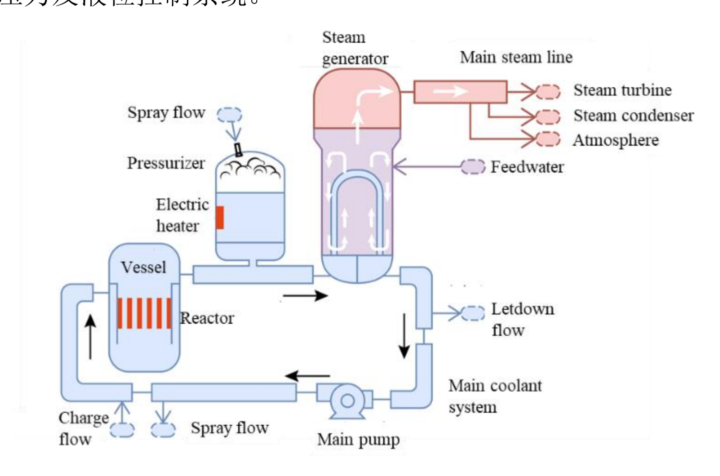


图 4 压水堆示意图[13]

Fig.4 Schematic diagram of a PWR

表 1 “华龙一号”压水堆核电厂关键参数[13]

Table 1 Key parameters of HPR1000 PWR NPP

参数 Parameters	数值 Value	单位 Unit
核功率 Nuclear power	3050	MW_{th}
一回路压力 Primary loop pressure	15.5	MPa
满功率冷却剂平均温度 Average coolant temperature at full power	580.15	K
稳压器体积 Pressurizer volume	51.7	m^3
单个环路质量流量 Single loop mass flowrate	22840	m^3/h
满功率给水流量 Full power feedwater flowrate	567	kg/s
满功率蒸汽压力 Full power steam pressure	6.72	MPa

基于设定值决策方案和压水堆核电厂模型，控制系统设定值决策的总体流程如图 5 所示，具体的流程为：

步骤 1：工程师根据电厂的实际需求，在数据库中设置一组待求解的算例 S_i，每个待求解算例都应包含系统的初始状态 x_0、目标状态 x_t 和决策时间范围$[t_0, t_e]$。系统初始状态指决策系统引入的 t_0 时刻压水堆电厂系统运行状态，如当前功率水平、蒸汽发生器液位、蒸汽压力、冷却剂平均温度、稳压器压力等状态；目标状态为采用该决策算例期望达到的 t_e 时刻系统对应的运行状态，决策时间范围指该决策算例优化的时域。

步骤 2：根据步骤 1 输入的状态和约束条件确定需要优化的目标函数。

步骤 3：将给定工况下的传统设定值曲线转化为决策设定值序列$[t, r]$的初始值，用作压水堆模型中相应控制系统设定值。

步骤 4：基于压水堆仿真模型，采用优化算法仿真计算该工况下对应的目标函数值，并根据计算结果进行迭代优化。

步骤 5：判断是否满足优化终止条件（连续 5 次迭代的全局最优解相对变化量小于 1×10^{-6}，或迭代次数超过最大限值），若满足则输出优化后的决策设定值序列。

根据上述步骤获得优化后的设定值序列，将其储存在决策数据库中用于后续在线调用，多个系统设定值优化流程可以并行。

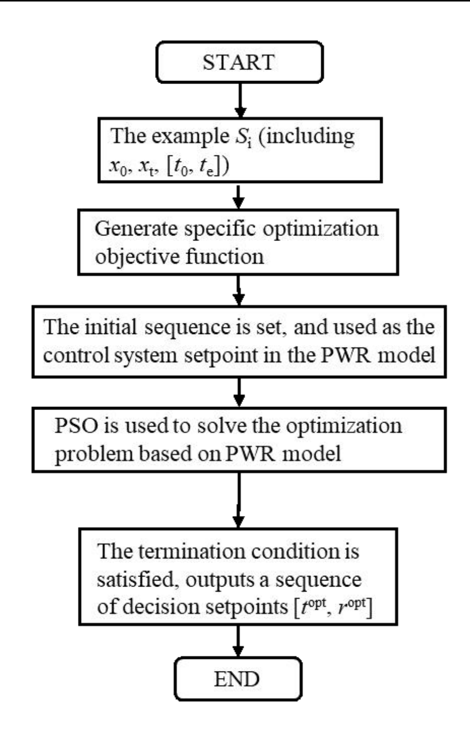


图 5 设定值优化总体流程
Fig.5 The overall process of setpoint optimization

2.1 目标函数和约束条件

为实现基于设定值修正的智能决策，需明确优化目标。决策系统整体的控制目标是保证系统可以在约束条件下完全快速地达到目标状态，需保证在控制过程中的跟踪性能较好，安全裕量足够和控制代价较小。设计如式(1) 所示的目标函数 J_{HPR}，相应地，一个算例的优化设定值曲线对应的控制性能可以视为 $J_{\mathrm{HPR}}(r, t)$，通过优化算法求解该目标函数，仿真优化设定值曲线，得到目标函数值最低的设定值曲线。

$$J_{\mathrm{HPR}} = \sum_{i=1}^{6}\omega_{i,\mathrm{ITSE}}\int_{t_0}^{t_e} t e_i^2(t)dt + \sum_{i=1}^{6}\omega_{i,\mathrm{peak}}\max\left(e_i^2\right) + \sum_{j=1}^{6}\omega_{j,\mathrm{eff}}\int_{t_0}^{t_e} t a_i^2(t)dt \tag{1}$$

式中：t_0— 决策系统引入时间/s；t_e— 决策系统瞬态结束时间，即回到稳态设定值的时间/s；$\omega_{\mathrm{i,ITSE}}$— 第 i 个参数的偏差 ITSE 惩罚系数，其中的 i=1~6 分别表示堆芯核功率、冷却剂平均温度、稳压器压力、稳压器液位、蒸汽发生器液位和蒸汽母管压力；e_i—— 第 i 个参数的偏差；$\omega_{\mathrm{i,peak}}$— 第 i 个参数的偏差峰值惩罚系数；$\omega_{\mathrm{j,eff}}$— 第 j 个执行机构控制动作的惩罚系数；a_i—— 第 i 个执行机构的动作变化量，其中的 j=1~6 分别表示 R 棒棒速、下泄调节阀、喷淋调节阀、电加热器、给水调节阀和旁路排放阀。

在式(1)的目标函数中，等式右侧的第 1 项为参数与名义设定值偏差的 ITSE 加权和，ITSE 是时间和误差平方的积分，当第 1 项越小时，表示各个参数对名义设定值的跟踪能力越好；第 2 项为偏差平方峰值的加权和，当第 2 项越小时，表示各个参数在设定值附近稳定运行，并远离触发停堆安全限值的能力越强；第 3 项为执行机构变化量的 ITSE 加权和，当第 3 项越小时，表示完成算例任务所需要使用执行机构的动作越少。因此，在选取惩罚系数时，需要考虑不同参数的单位差异，缩放比例可以参考对应得稳态运行方案曲线斜率，除此之外还需考虑特定工况的控制需求，比如在甩负荷过程中，由于系统工况变化迅速容易触发停堆，可以增大第 2 项即偏差峰值惩罚系数，进一步减少瞬态过程中机组触发停堆限值的概率，减少非计划停堆的可能。

约束条件主要包含压水堆电厂运行过程中的安全运行范围约束和设备的物理约束两类。

安全运行范围约束：包括安全运行时的蒸汽发生器液位上下限 L_{sg}；稳压器液位上下限 L_{pzr}；稳压器压力上下限 P_{pzr}；蒸汽压力上下限 P_{sg}；一回路平均温度上下限 T_{ave} 等，式 (2) 为优化过程中部分安全约束条件。

$$22\% < L_{\rm sg} < 68\%, 22.5\% < L_{\rm pzr} < 77.5\%, 12.45{\rm MPa} < P_{\rm pzr} < 15.5{\rm MPa},$$
$$5.2{\rm MPa} < P_{\rm BP} < 8.5{\rm MPa}, T_{\rm ave} < 325°{\rm C} \tag{2}$$

物理约束：包括各类设备如喷淋阀 V_{pzr}、给水调节阀 V_{fw}、下泄流量阀 V_{ld} 等的阀门动作速度和幅值约束；电加热器 Q_{pzr} 的最大加热功率及速度约束；R 棒 H_{Rrod} 和 G 棒 H_{Grod} 的速度和幅值约束，在实际压水堆电厂运行中还需考虑硼浓度变化和轴向功率分布等约束。部分设备幅值约束如式 (3) 所示：

$$0 \le V_{\rm pzr}, V_{\rm fw}, V_{\rm ld} \le 100\%, 0 \le H_{\rm Rrod} \le 220{\rm pas}, 0 \le H_{\rm Grod} \le 615{\rm pas}, 0 \le Q_{\rm pzr} \le 1872KW \tag{3}$$

2.2 设定值优化计算

从顶层根据优化目标对多个控制回路设定值曲线进行优化的问题从根本上来说是一个非凸参数优化问题，非凸参数优化问题使用基于梯度的优化算法容易陷入局部最优或鞍点，因此考虑采用智能优化算法求解全局最优解。粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是由美国 Kennedy 和 Eberhart 教授于 1995 年首先提出的[14]，该算法利用粒子成员之间的交互和通信进行不依赖梯度的全局寻优，通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优解，更适合于状态反馈控制参数的寻优过程[15, 16]。相比于遗传算法，粒子群优化算法规则更为简单，具有实现容易、精度高、收敛快等优点，因此本文将粒子群寻优作为优化算法，采用的粒子群元参数选取了 Pedersen 推荐的参数[17]。

基于粒子群算法优化流程和上述算例问题，基于仿真模型在约束条件下求解给定算例的目标函数，最后输出决策设定值序列，具体的优化流程如图 6 所示。

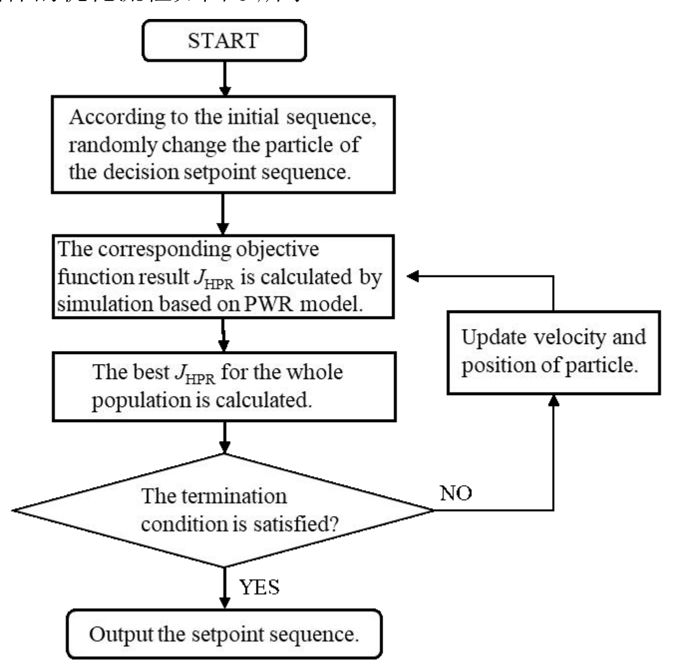


图 6 粒子群算法算例优化流程
Fig.6 example optimization process based on PSO

3 控制性能仿真验证

3.1 汽轮机负荷从 100%FP 线性降低至 25%FP 仿真实验

压水堆仿真平台非线性模型汽轮机负荷设定值在第 100s 开始经过 900s 线性降低至 25%FP，下降速率为 5%/min，仿真时间设置为 1500s。本文考虑的设定值优化考虑了冷却剂平均温度、稳压器液位、蒸汽发生器液位和蒸汽压力。按照本文提出的策略进行设定值决策计算，综合考虑了单位的数量级差异与参数对安全运行的重要程度，将目标函数式（1）中的加权系数依次设为 $\omega_{\rm ITSE}$ = [1×10^{-6}, 1.5×10^{-5}, 3×10^{-2}, 1×10^{-6},

$2.5\times10^{-4}, 1\times10^{-2}]^T$, $\omega_{peak} = [1, 2, 40, 1, 4, 20]^T$, $\omega_{eff} = [4\times10^{-9}, 2\times10^{-6}, 1.5\times10^{-4}, 1.2\times10^{-12}, 1.3\times10^{-4}, 2\times10^{-5}]^T$，决策时域为[100,1100]，决策时域内时间点 n=4，决策时域为[100,1500]。PSO 优化后的结果，以及优化后设定值曲线和传统控制设定值曲线分别如图 7 所示。

图 7(a) 展示了该实验中 使用 PSO 算法进行时每代种群的最佳适应度变化情况，将传统设定值作为设定值寻优的初始值，第 0 代种群的适应度值等于使用传统设定值进行仿真试验的总性能指标结果。可以看出目标函数值 J_{HPR} 随着设定值曲线的优化逐渐降低，证明该设定值优化可以提升压水堆控制系统整体的控制性能。

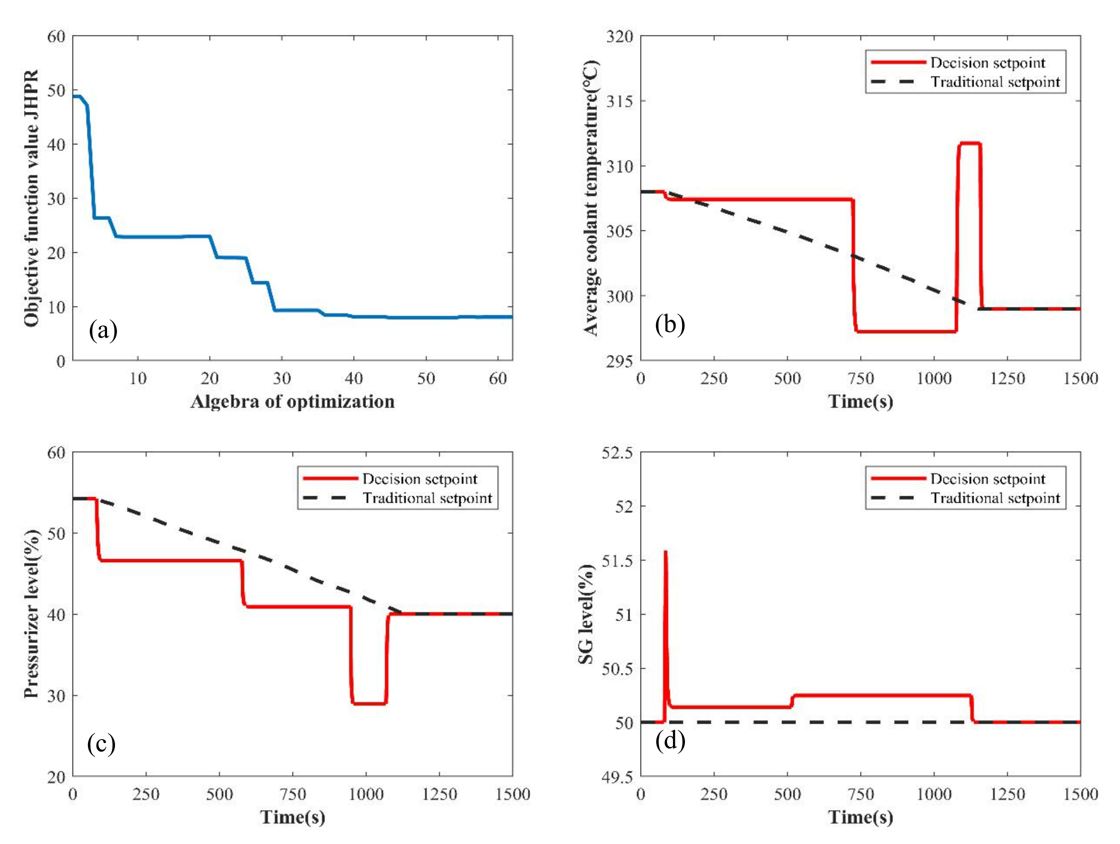


图 7 智能决策设定值优化结果 (a)决策设定值寻优过程，(b) 一回路平均温度设定值，(c) 稳压器液位设定值，(d) 蒸汽发生器液位设定值

Fig.7 Intelligent decision setpoint optimization results (a) decision setpoint optimization process, (b) average coolant temperature setpoint, (c) pressurizer level setpoint, (d) steam generator level setpoint

采用优化后的设定值曲线和传统设定值曲线的仿真结果如图 8 所示，主要执行机构的响应对比如图 9 所示。由于优化设定值根据实际工况提前改变控制目标，因此其控制下的执行器动作趋势应该是与传统设定值趋势大体一致，但在执行器动作变化的时间点上会提前。

对于冷却剂平均温度控制系统，在功率线性下降的过程中，结合图 7(b)和图 8(b)，可以看到传统设定值曲线控制下的冷却剂平均温度在第 100s 至第 130s 高于设定值，因此为了使实测温度更接近传统设定值，优化后的设定值在该过程中一直低于传统设定值；自 130s 至第 730s，传统设定值下的实测温度一直低于设定值，因此优化后的设定值在该过程中一直高于传统设定值；从 600s 至 950s，传统设定值下的实测温度一直高于设定值，因此优化后的设定值在该过程中一直低于传统设定值；从 950s 至 1050s，传统设定值下的实测温度一直低于设定值，因此优化后的设定值在该过程中高于传统设定值。其执行器在两种设定值方案下的响应如图 9(a)所示，功率补偿棒根据目标负荷下插，优化设定值控制下的 R 棒动作的时间点提前于传统设定值控制下的 R 棒，使得冷却剂平均温度具有更小的超调量与调节时间。

同理，从图 7(c)和图 8(c)可以看出采用优化设定值曲线进行控制的稳压器液位波动幅度更小。在此基础上，由于采用优化设定值曲线控制后的冷却剂温度波动更小，波动管中的波动流量导致的稳压器的压力与液位波动也相应减小，并且在决策优化和稳压器压力液位解耦控制系统的组合作用下，通过提前调节喷淋、电加热器和下泄阀，使得稳压器的压力和液位始终维持在设定值附近，如图 8(d)所示，使用优化设定

值的稳压器压力波动明显小于仅使用传统设定值的压力波动。

在二回路，由于汽轮机蒸汽阀的开度逐渐降低，出口蒸汽流量随之减少，如图 8(f)所示二回路的压力逐步上升。在蒸汽流量逐渐降低的过程中，上层的智能决策系统提前改变液位设定值，下层液位模型预测控制器根据设定值曲线、蒸汽流量变化和热管段温度变化的可测扰动信息，如图 9(b)快速降低给水主调阀开度，减少带来的液位波动，如图 8(e)所示。

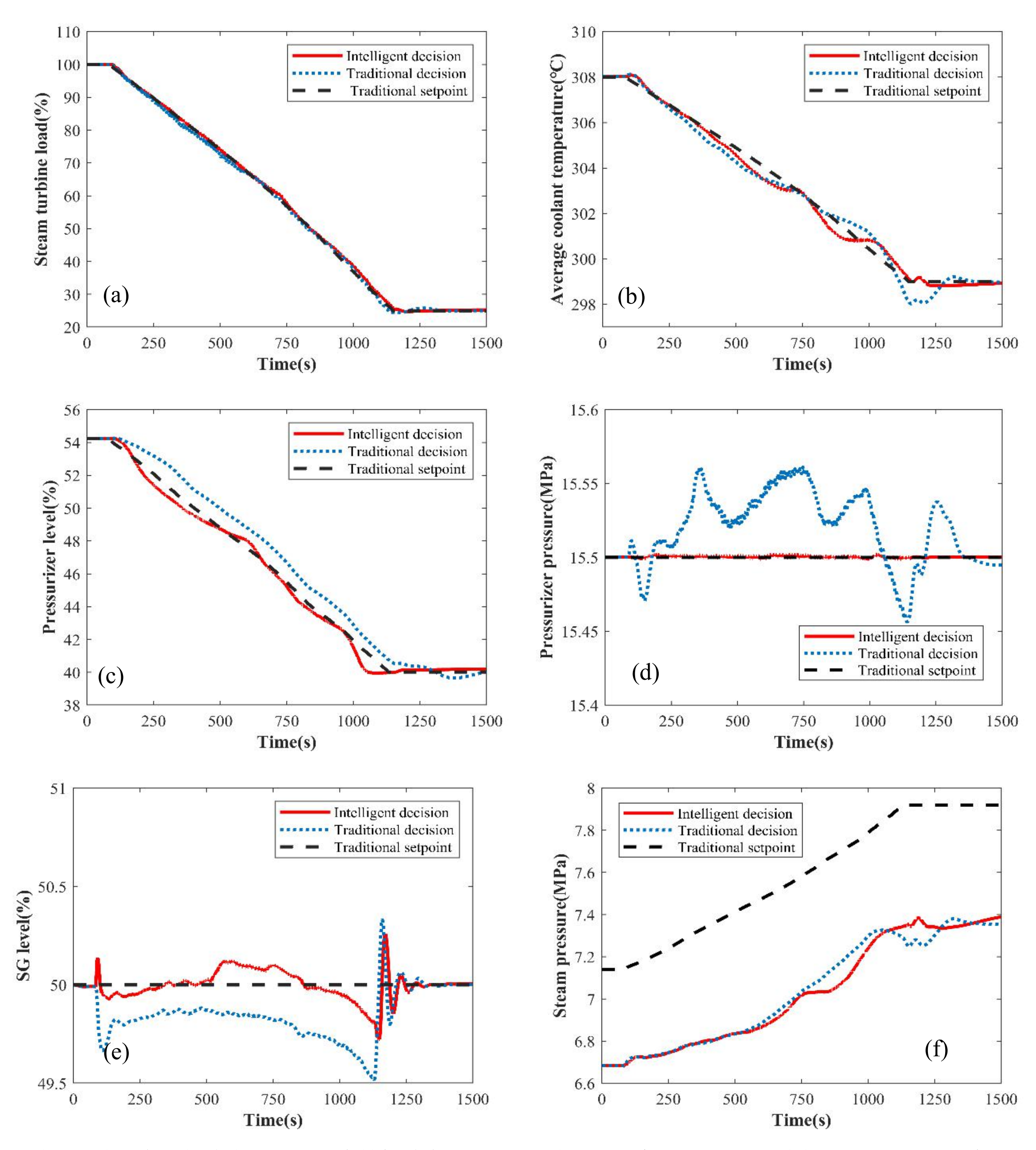
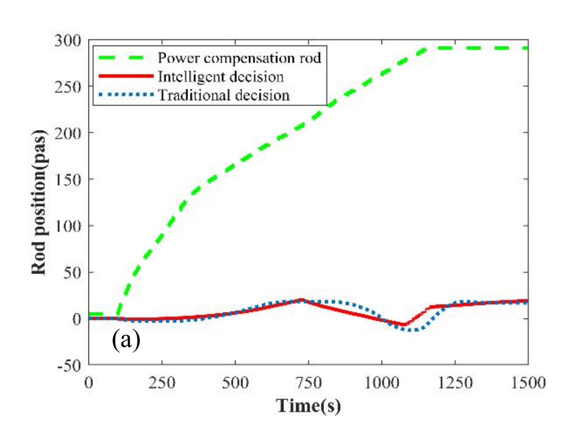


图 8 两种设定值方案下的响应对比 (a) 汽轮机功率，(b) 一回路平均温度，(c) 稳压器液位，(d) 稳压器压力，(e) 蒸汽发生器液位，(f) 蒸汽压力

Fig.8 simulation responses under two setpoint schemes (a) steam turbine power, (b) average coolant temperature, (c) pressurizer level, (d) pressurizer pressure, (e) steam generator level, and (f) steam pressure



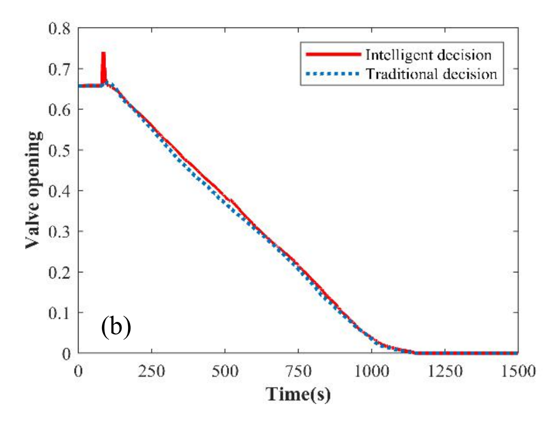


图 9 两种设定值方案下的执行机构响应对比 (a) R 棒和补偿棒棒位，(b) 给水主调阀开度
Fig.9 simulation responses of main actuators under two setpoint schemes (a) rod positions of R rods and power compensation rod, (b) opening of feedwater valves

在整个功率下降过程中，同样的控制系统，使用优化设定值曲线相比于使用传统设定值曲线表现出更小的超调量和调节时间。表 2 中展示了冷却剂平均温度、稳压器液位、稳压器压力和蒸汽发生器液位在采用不同设定值方案下计算得出的 ITSE 指标和峰值指标。可以看出，同样的控制器采用智能决策方案后各指标明显低于传统控制方案下的控制指标，相对于采用传统设定值的控制方案，冷却剂平均温度，稳压器液位，稳压器压力和蒸汽发生器液位的 ITSE 分别下降了 58.9%，67.7%，99.9%和 83.3%；峰值指标分别下降了 62.4%，3.0%，100%，66.3%。仿真结果表明采用决策设定值方案能够从底层充分利用系统可测信息，改善压水堆核电厂在慢速负荷变化过程中主要参数的设定值跟踪能力与抗扰能力，提高控制效果和安全裕量。

表 2 线性降负荷实验性能指标对比
Table 2 Comparison of performance indicators of linear load decrease

被控对象 Controlled objects		ITSE ITSE	峰值指标 Peak value index
冷却剂平均温度 Average coolant temperature	传统方案 Traditional scheme	2.87	1.86
	智能决策方案 Intelligent decision scheme	1.18	0.70
稳压器液位 pressurizer level	传统方案 Traditional scheme	0.62	3.61
	智能决策方案 Intelligent decision scheme	0.20	3.50
稳压器压力 pressurizer pressure	传统方案 Traditional scheme	28.7	0.07
	智能决策方案 Intelligent decision scheme	0.01	0.00
蒸汽发生器液位 SG level	传统方案 Traditional scheme	9.65	0.92
	智能决策方案 Intelligent decision scheme	1.61	0.31

4 结论

为了从顶层协调多个控制系统使得系统整体控制性能获得优化，取得更好的任务执行效果，本文提出了压水堆电厂智能决策方案，可以根据运行工况和目标对控制系统设定值曲线进行离线优化，在实际运行过程中调用优化设定值曲线进行在线决策。设计了基于粒子群优化算法的压水堆电厂设定值决策系统，从跟踪性能、安全性和控制代价三个维度进行综合评估，构建了优化所需的决策目标函数及决策优化需要满足的运行约束条件。通过压水堆核电厂典型工况进行设计与仿真验证，验证了所提出的设定值决策系统相比于传统设定值运行方案可以降低 ITSE 和峰值指标，在线性降负荷测试中，相对于采用传统设定值的控制方案，所提出的方案可降低多个系统相互干扰造成的控制性能损失，改善压水堆电厂控制系统的整体控制性能和提升安全裕量。在实际工程实践中，可以与数字孪生技术结合，利用孪生体能同步反映系统真实状态的特点，进行更精确的在线设定值优化，从而达到更好的控制性能。

作者贡献声明 张琦：负责方案设计和实验实施、数据分析和文章撰写；孙培伟：负责提供研究思路、分析技术路线、进度监督、文章的审阅；张贤山：负责方案设计和实验设计，提供技术支持与指导；魏新宇：负责文章的审阅。

参考文献

1 邱建文, 徐瑞, 赵宇庭. 小型核反应堆自主控制及其深空探测应用设想[J]. 宇航学报, 2019, 40(1): 1–8. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2019.01.001.

QIU Jianwen, XU Rui, ZHAO Yuting. Autonomous control of small nuclear reactor and its applications for deep space exploration[J]. Journal of Astronautics, 2019, 40(1): 1–8. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2019.01.001.[知网中文][知网英文]

2 Deng Z G, Wu Q, Zhu B W, et al. Research of SSAE-GPC in coordinated control system of nuclear power plant[M]//Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2021: 199–215. DOI: 10.1007/978-981-16-3456-7_21.[LinkOut]

3 Qian H, Zhou M Y. Application of adaptive fuzzy nonlinear control with variable universe in liquid level control of steam generator[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(1): 116-126. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.235. 【自助补缺】【自助补缺】【自助补缺】【自助补缺】

4 Fang Y J, Fei M R, Qian H, et al. Nuclear reactor power level model predictive control: a consideration of coolant outlet temperature relaxation tracking method[J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 196(7): 886–898. DOI: 10.1080/00295639.2022.2027737.[LinkOut]

5 Eilon S. What is a decision?[M]. Management Control. London: Palgrave, 1971: 135-162.10.1007/978-1-349-01281-7_7[LinkOut]

6 Hanna B, Son T C, Dinh N. An artificial intelligence-guided decision support system for the nuclear power plant management[C]. Proceedings of the 18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH 2019), 2019. 【自助补缺】【自助补缺】【自助补缺】【自助补缺】

7 Xiong N C. Application of artificial intelligence technology in decision support software[C]//2019 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS). Jishou, China. IEEE, 2019: 199–202. DOI: 10.1109/ICVRIS.2019.00056.[LinkOut]

8 Edwards R M, Lee K Y, Schultz M A. State feedback assisted classical control: an incremental approach to control modernization of existing and future nuclear reactors and power plants[J]. Nuclear Technology, 1990, 92(2): 167–185. DOI: 10.13182/nt90-a34468.[LinkOut]

9 Coban R, Can B. An expert trajectory design for control of nuclear research reactors[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(9): 11502–11508. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.03.005.[LinkOut]

10 Wang P F, Wan J S, Wu S F, et al. A fuzzy-logic-based pressure setpoint modification method for pressurized water reactor pressurizers[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 135: 106954. DOI: 10.1016/j.anucene.2019.106954.[LinkOut]

11 尹刚. 压水堆核电厂反应堆与汽轮机功率协调控制方案的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018. DOI: 10.27307/d.cnki.gsjtu.2018.000311.

YIN Gang. Study on Coordinated Control Scheme between Reactor Power and Turbine Power in Pwr Nuclear Power Plant[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.[知网硕士中文][知网硕士英文]

12 Zhang X S, Sun P W, Wei X Y. Design of an output feedback pressurizer controller with a decoupling precompensator for PWRs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2022, 69(7): 1712–1724. DOI: 10.1109/TNS.2022.3183994.[LinkOut]

13 Zhang X S, Sun P W, Qiu L L, et al. Transfer function modeling and simulation of HPR1000[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 166: 108689. DOI: 10.1016/j.anucene.2021.108689.[LinkOut]

14 Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural

Networks. Perth, WA, Australia. IEEE, 2002: 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.[LinkOut]
15 Wang P F, Yan X, Zhao F Y. Multi-objective optimization of control parameters for a pressurized water reactor pressurizer using a genetic algorithm[J]. Annals of Nuclear Energy, 2019, 124: 9–20. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.09.026.[LinkOut]
16 Vaswani P D, Chakraborty D. Optimal state feedback controller for a nuclear reactor[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(12): 2379–2387. DOI: 10.1109/TNS.2019.2951087.[LinkOut]
17 Pedersen M E H. Good parameters for particle swarm optimization[J]. Hvass Laboratory, Copenhagen, Denmark, Tech Rep HL1001, 2010: 1551-3203.【自助补缺】【自助补缺】【自助补缺】【自助补缺】